

建設省 正員○中谷 昌一
 京都大学工学部 正員 丹羽 義次
 京都大学工学部 正員 広瀬 壮一

1. はじめに

一般に、構造物の破損は最も苛酷な応力状態にある欠陥周辺、ないしは弱面上から生じるものと考えられる。従って、ひび割れや切り欠き等の欠陥の存在は、構造物の耐荷力を評価する上で非常に重要であり、これらの欠陥の検出のため超音波測定法やAE法等の非破壊検査法が開発、実用化されている。本研究は、これら非破壊検査法の基礎的研究と位置づけられるクラックによる波動散乱問題を、平面応力状態を仮定し、2次元面内問題として理論、及び実験の両面から解析を行ったものである。具体的には、クラックの位置、傾斜角度をパラメータとし、これに平面波が入射した場合について、理論的には境界要素法を用いて数値計算を行い、各パラメータの自由表面上の変位に及ぼす影響を明らかにした。また、一方、アクリル板によりモデル供試体を作製し、AE計測装置を用いて実験を行い、クラックの位置、傾斜角度を変化させた場合について数値解析結果との比較検討を行った。

2. 理論的解析

Fig.1に示すようにクラックがある有限な厚みを有するものと考え、境界条件； $t_i(x_0) = 0$ 、 $x_0 \in \partial S_0$ 、 ∂S_1 を考慮して定式化を行うと次の積分方程式が得られる。

$$\frac{1}{2} u_i^T(x_0; \omega) = u_i^P(x_0; \omega) - \int_{\partial S_1} u_m^S(y; \omega) D_i^m(x_0, y; \omega) dS_y - \int_{\partial S_0} u_m^T(y; \omega) D_i^m(x_0, y; \omega) dS_y \quad (x_0 \in \partial S_0) \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} u_i^S(x_0; \omega) = - \int_{\partial S_1} u_m^S(y; \omega) D_i^m(x_0, y; \omega) dS_y - \int_{\partial S_0} u_m^T(y; \omega) D_i^m(x_0, y; \omega) dS_y \quad (x_0 \in \partial S_1) \quad (2)$$

ここで u_i は変位を、 D_i^m は二重層ポテンシャルを表わし、更に添字T、S、Pにより全変位、クラックの影響による変位、入射波と反射波の和からなる変位を区別して表わした。 u_i^P については理論解析が既知であり、式(1)、(2)を連立し数値解析することにより ∂S_1 上の u_i^S 、 ∂S_0 上の u_i^T を求めることができる。一方、Fig.2に示すようにクラックを2つの向いた面 ∂S_0^+ 、 ∂S_0^- で構成されるものと考え、 ∂S_1 上の x_0 に対して、次式が得られる。

$$\frac{1}{2} u_i^S(x_0; \omega) = - \int_{\partial S_1} u_m^S(y; \omega) D_i^m(x_0, y; \omega) dS_y - \int_{\partial S_0^+} \bar{D}_i^m(x_0, y; \omega) \Delta u_m^T(y; \omega) dS_y - \int_{\partial S_0^-} \bar{D}_i^m(x_0, y; \omega) \Delta u_m^T(y; \omega) dS_y \quad (x_0 \in \partial S_1) \quad (3)$$

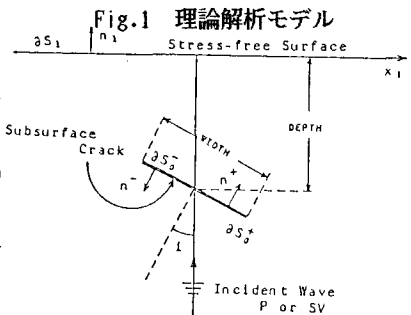
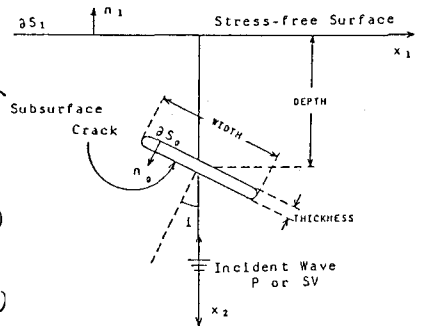
ここに Δu_i^T は次式のように、2つの面 ∂S_0^+ 、 ∂S_0^- の変位のくい違い量として定義される量である。

$$\Delta u_m^T(y; \omega) = \bar{u}_m^T(y; \omega) - u_m^T(y; \omega) \quad (4)$$

一方、クラック面 ∂S_0 上の u_i^T について定式化を行うと u_i^T 、 Δu_i^T 、 u_i^S が未知量となり解けない。従って、 ∂S_0 上については応力ベクトル $\bar{t}_i^T$ を考え、 ∂S_0 上の境界条件を考慮し、定式化を行うと次式ようになる。

$$0 = \bar{t}_i(x_0) C_{ijkl} \{ u_{k,l}^P(x_0; \omega) - \int_{\partial S_1} u_m^S(y; \omega) D_{k,l}^m(x_0, y; \omega) dS_y - pf \int_{\partial S_0^+} \bar{D}_{k,l}^m(x_0, y; \omega) \Delta u_m^T(y; \omega) dS_y \} \quad (x_0 \in \partial S_0^+) \quad (5)$$

ここに $pf \int \cdot dS$ は発散積分の有限部分を表す。式(5)において未知量は ∂S_1 上の u_i^S 、 ∂S_0 上の Δu_i^T であり、従って、式(3)と連立させることにより、 u_i^S 、 Δu_i^T が求められる。



3. 実験的解析

本実験では、厚さ5mmのPMMA板、及び真ちゅう棒によりモデル供試体を作製した。Fig.3に示すように、クラックはモデル供試体の右側斜面近傍に存在する。真ちゅう棒左端に設置した変換子から信号発生器により方形電圧を入力し、波動を発生させる。このとき、右側斜面の傾斜角度を調整することにより自由表面である右側斜面に鉛直下方から平面P波が入射した場合を解析した。供試体内を伝播してきた波動は、右側斜面に設置した変換子により電気信号に変換され、ある波形として検出される。使用した変換子は圧電素子(NF製905S、905U)であり、接着面に対し垂直方向の波動をとらえることができる。

4. 実験解析結果、及び、理論解析結果の関連性

実験の伝達経路は入力システム、モデル供試体、計測システムの3つからなるものと考えられ、それぞれの伝達関数を W_1 、 W_2 、 W_3 で表す。2つの異なるモデル供試体I、及びIIに対し実験を行うことを考え、このとき、同一の入力、及び計測システムを用いるとすれば

$$G^{\text{II}}(\omega)/G^{\text{I}}(\omega) = W_2^{\text{II}}(\omega)/W_1^{\text{I}}(\omega) \tag{6}$$

が成立する。ここに、Gは得られた波形をFourier変換したものである。供試体I、IIとしてそれぞれクラックを有するものと有していないものを用いれば、式(6)よりクラックの影響を検出できる。一方、理論的に求めた全変位は実験における伝達関数 W_2 と等しいことから式(6)より両解析の関連性を示す次式が得られる。
$$u_2^{\text{T}}(\omega)/u_2^{\text{P}}(\omega) = G^{\text{II}}(\omega)/G^{\text{I}}(\omega) \tag{7}$$

5. 結果、並びに、考察

まず波の伝播状況をFig.4に示す。Fig.4におけるクラックは自由表面に平行であり、クラック幅の1/2の深さに位置している。解析地点5は x_1 - x_2 座標の原点にあたり、この点の鉛直下方にクラック中央があり、入射したP波が直接到達せず、クラックによって反射するため、波の到達時間が遅く、波の振幅も小さくなっている。Fig.5は同じクラックに対する理論解析結果であり、横軸にはクラックの深さで無次元化した波数をとった。クラックの真上の点4、5、6において低周波領域に非常に大きい応答倍率が見られる。この現象はクラックの法線方向と入射波の入射方向とが一致する時に著しく大きくなり、クラックが傾斜しある角度を持つようになると急速に減少することがわかった。Fig.6は同じクラックに対し解析地点5における理論、及び実験結果をプロットしたものである。この図より、両解析結果が全周波数領域においてほぼ同一の傾向を示しており、本実験による解析が妥当であることがわかる。

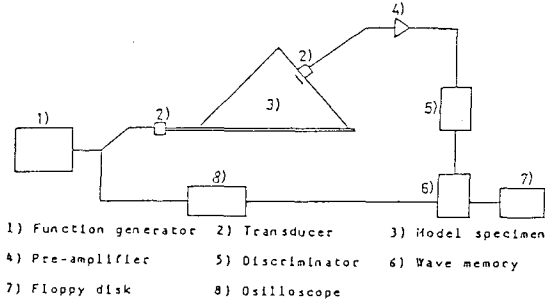


Fig.3 実験概要図

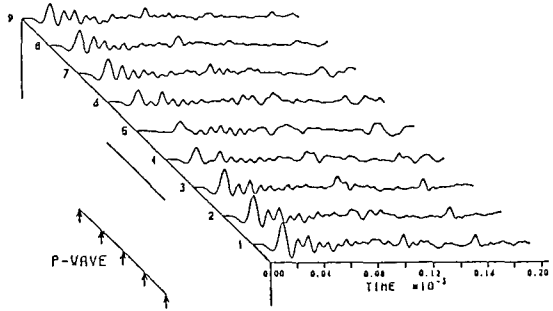


Fig.4 実験検出波形

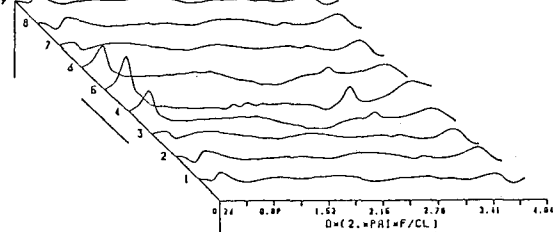


Fig.5 理論解析結果 (応答倍率図)

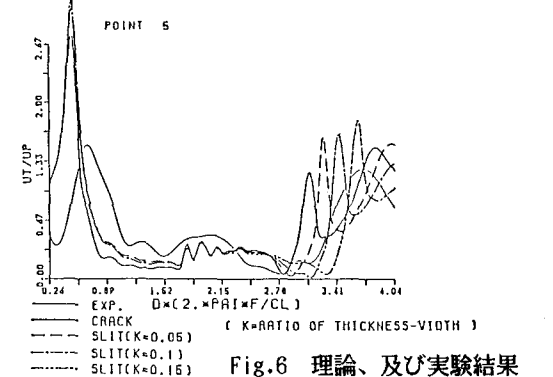


Fig.6 理論、及び実験結果